
Club Cast3M 2007

La fatigue biaxiale dans CAST3M: Application à la fatigue thermique.

Problématique de la fatigue biaxiale



Méthodologie d'estimation de la durée de vie Utilisation de la méthode de comptage RAINFLOW

Présentation des critères multiaxiaux

- Critère de Zamrik
- Critère de Manson Halford
- Critère énergétique avec pression hydrostatique

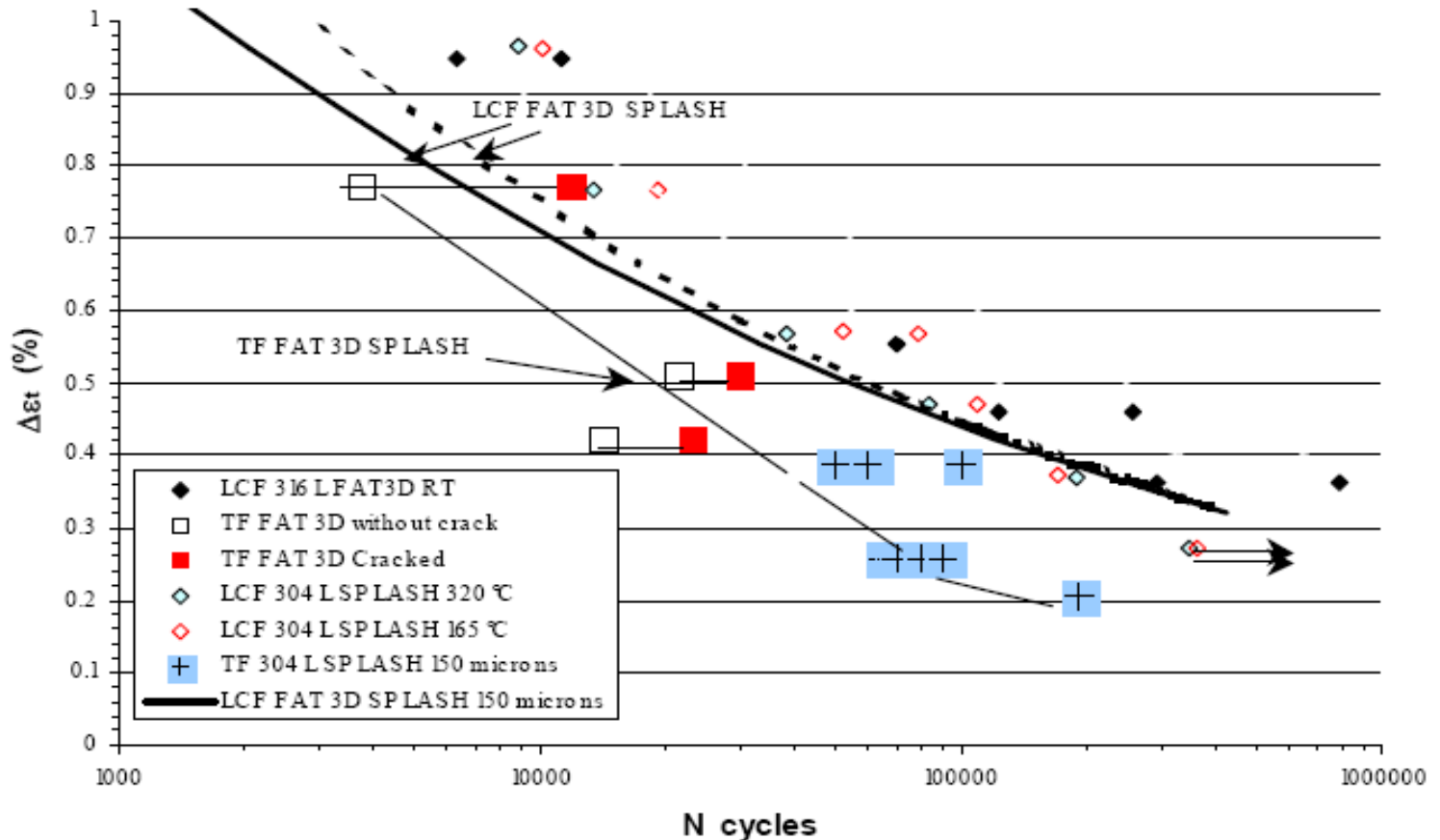
Application des critères à l'expérience de fatigue thermique : SPLASH

Application de la méthode d'estimation de la durée de vie pour des chargements biaxiaux

- Réalisation des calculs Elasto-plastiques sur une structure soumise à des chargements thermiques (travail réalisés dans le cadre d'un benchmark)
- Application des critères de fatigue



La fatigue thermique est plus endommageante que la fatigue uniaxiale



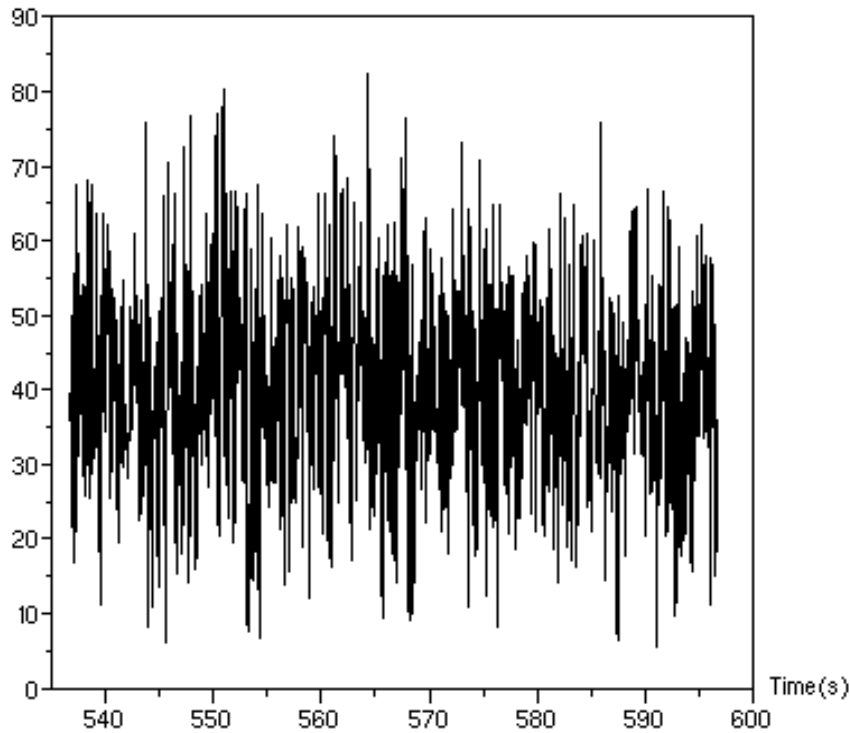
Hypothèse : due à la multiaxialité du chargement

Particularité du chargement

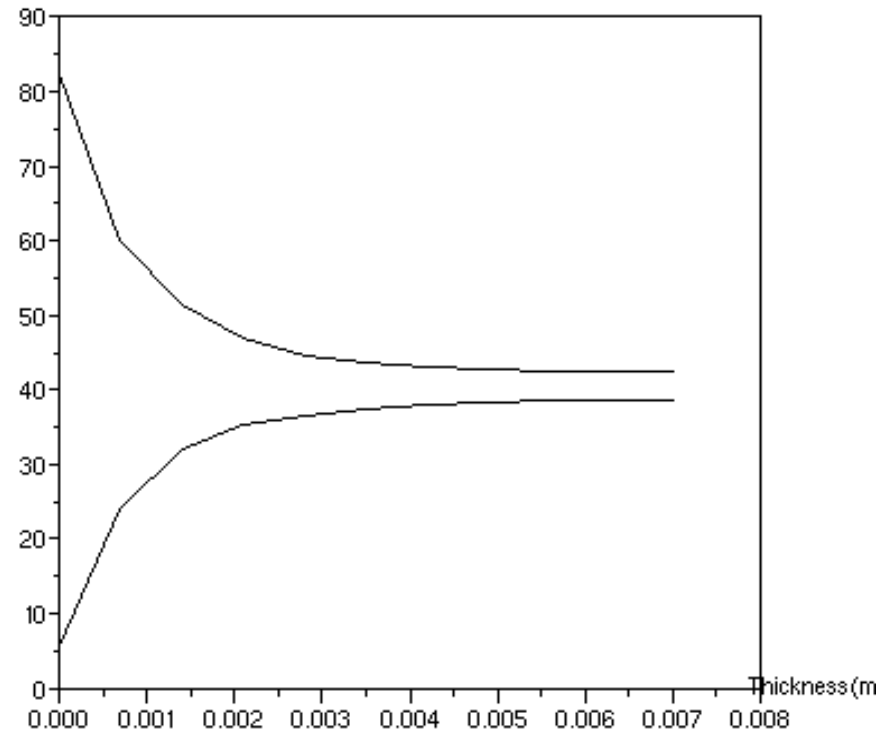
- Historique complexe
- Historique différent en chaque points de la structure
- Evolution en fonction de l'épaisseur



Temperature(°C)



Temperature(°C)



Mise en place d'une démarche d'estimation de dommage intégrale dans le code de dimensionnement RCC-MR

Détermination d'une variation de déformation équivalente (application des différents critères)

$$\overline{\Delta \varepsilon} = \overline{\Delta \varepsilon_1} + \overline{\Delta \varepsilon_2} + \overline{\Delta \varepsilon_3} + \overline{\Delta \varepsilon_4}$$

$$\overline{\Delta \varepsilon_1} = \frac{2(1+\nu)}{3} \overline{\Delta \sigma_{el}}$$

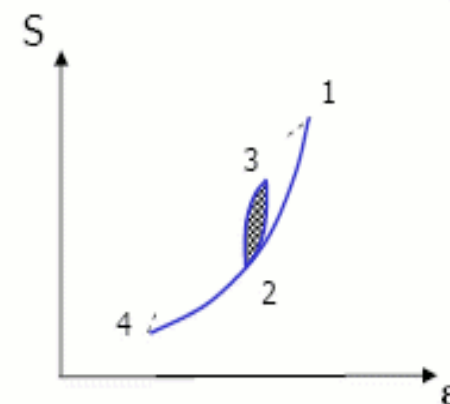
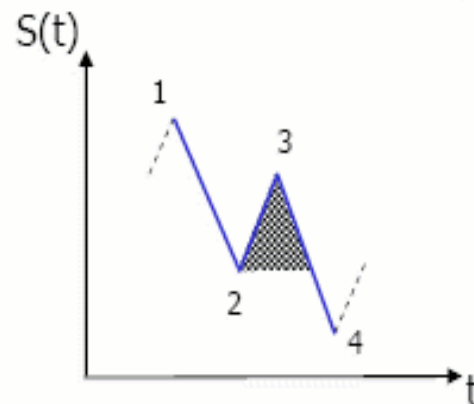
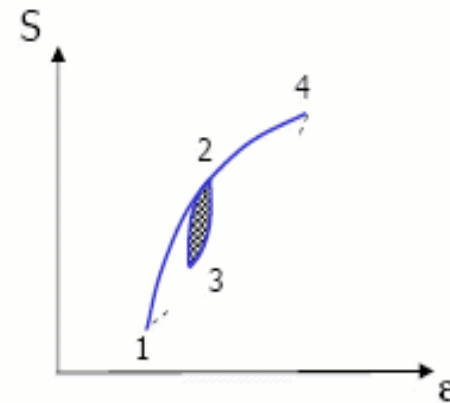
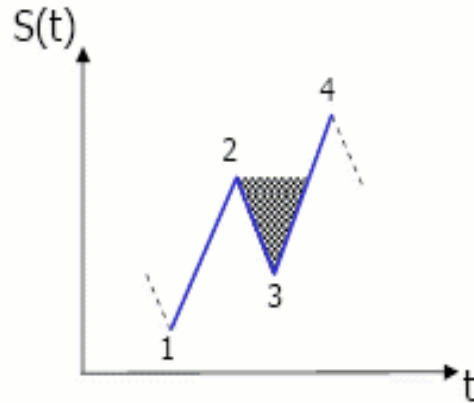
$\overline{\Delta \varepsilon_2}$ et $\overline{\Delta \varepsilon_3}$ représente la majoration plastique

$\overline{\Delta \varepsilon_4} = (K_\nu - 1) \overline{\Delta \varepsilon_1}$ avec K_ν est défini dans le RCC-MR

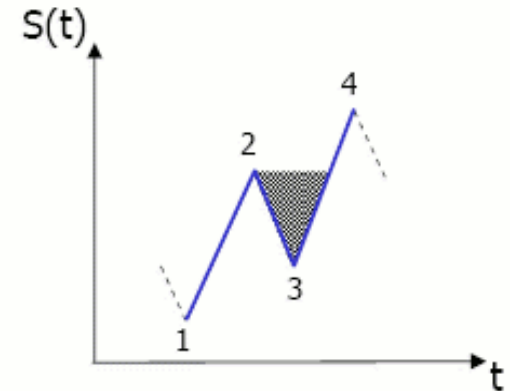
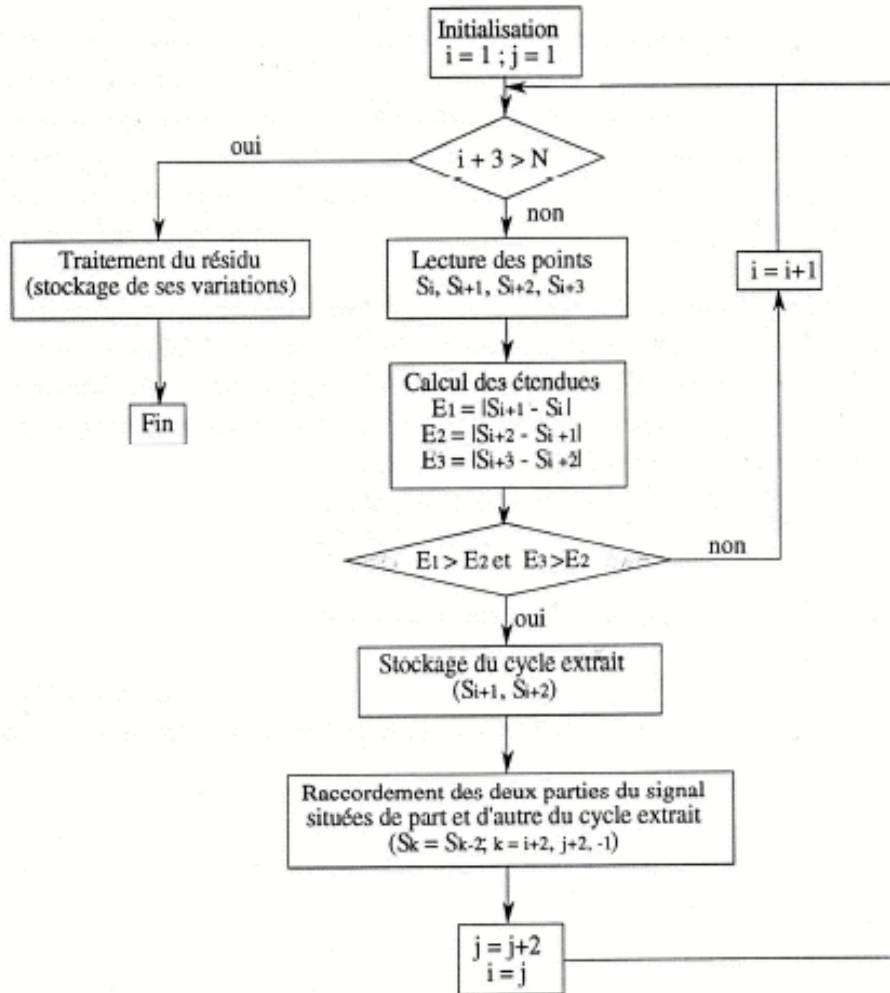
Extraction des cycles via la méthode de comptage RAINFLOW,
Obtention d'une séquence de cycles de variations de déformations équivalentes

- **Algorithme Rainflow AFNOR A03-406 (4 points , 3 étendues)**

Principe général d'extraction d'un cycle de chargement : 4 points successifs 1, 2, 3 et 4



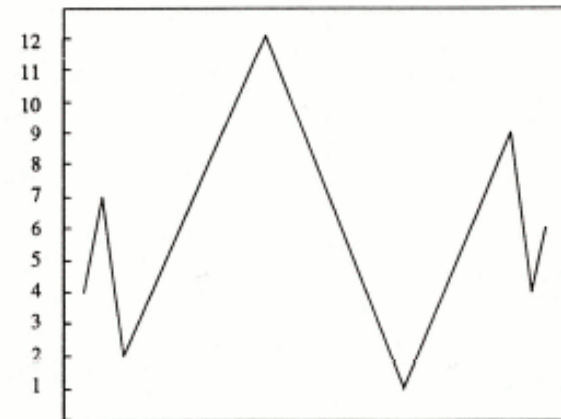
- Algorithme Rainflow AFNOR A03-406



- **Traitement du résidu**

Résidu : signal dont les étendues de variation successives vont en croissant, puis en décroissant

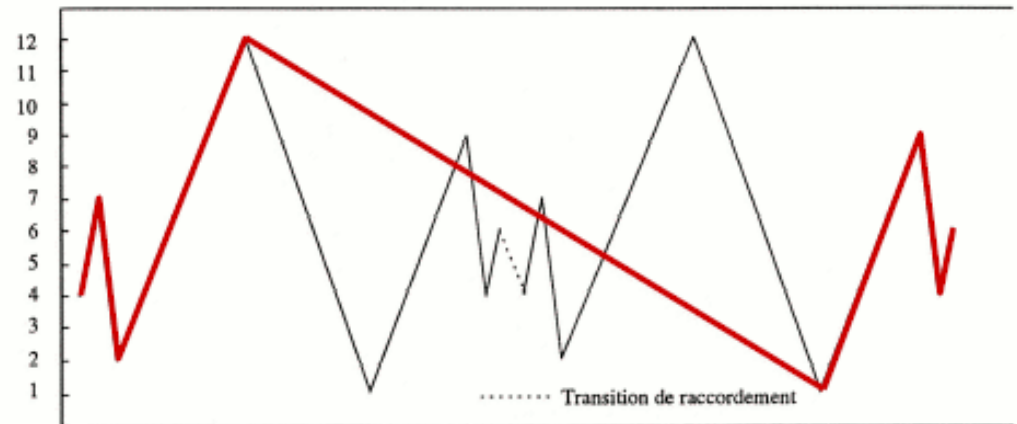
Exemple de Résidu



Résidu : 4-7-2-12-1-9-4-6

Raccordement du Résidu

Traitement Rainflow : on retrouve le résidu



Mise en place d'une démarche d'estimation de dommage intégrale dans le code de dimensionnement RCC-MR



Détermination du facteur d'usage pour chaque cycle extrait

$$A_i = n_i / N_{ai}$$

n_i : nombre de cycles avec la variation de déformation équivalente i

N_{ai} : Nombre de cycle à l'amorçage pour la variation de déformation i

Détermination du facteur d'usage total (Règle de cumul linéaire)

$$A = \sum A_i = \sum (n_i / N_{ai})$$



Outils mis en oeuvre dans Cast3M pour traiter la fatigue biaxiale ou la fatigue thermique

Détermination des valeurs de variations de déformations à l'aide des différents critères (GIBIANE), utilisation des invariants, etc...

Extraction des cycles via la méthode RAINFLOW pour chaque point de la structure (Outils de comptage RAINFLOW, ESOPE)

Détermination du taux d'usage en chaque point, fonction de son propre historique (nombres, enchainement et nature des cycles différents d'un point à l'autre), Utilisation de la règle de miner pour le cumul de dommage (Outils ESOPE)

Expression du critère de Zamrik

$$\Delta \varepsilon_{eq}^t = (Z^{1-TF}) \Delta \varepsilon_{eq}^e + (\Lambda^{1-TF}) \Delta \varepsilon_{eq}^p$$

$$\Delta \varepsilon_{eq}^p = \Lambda^{1-TF} \varepsilon'_f \text{ avec } \Lambda \approx 2$$

$$\Delta \varepsilon_{eq}^e = Z^{1-TF} \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^{-b}$$

$$\text{TF} = 1, \text{ on a : } (\Delta \varepsilon_{eq}^e)_{axial} = \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^{-b}$$

$$\text{TF} = 0, \text{ on a : } (\Delta \varepsilon_{eq}^e)_{torsion} = Z \frac{\sigma'_f}{E} (2 N_f)^{-b} = Z (\Delta \varepsilon_{eq}^e)_{axial}$$

Hypothèses :

Evolution identique en fonction du taux de triaxialité

- pour la déformation plastique équivalente
- pour la ductilité pour un chargement de traction multiaxié

Zamrik détermine une évolution qui vaut sensiblement 2^{1-TF} pour $0 \leq TF \leq 6$

Mise en oeuvre pour un acier 304L à 600°C

Seule la partie plastique est modifiée avec un coefficient dépendant du taux de triaxialité, telle que :

$$\Delta^* \epsilon_{eq}^t = \Delta \epsilon_{eq}^e + \Delta^* \epsilon_{eq}^p$$

$$\Delta^* \epsilon_{eq}^p = MF \Delta \epsilon_{eq}^p$$

$$MF = TF \text{ pour } TF \geq 1$$

$$MF = \frac{1}{2 - Tf} \text{ pour } TF \leq 1$$

Pas de paramètre matériau

Critère énergétique avec Pression Hydrostatique développé

à partir du calcul de l'énergie dissipée $W_d = \int_{cycle} \sigma : \dot{\epsilon}^p dt$

Ce critère mis en place dans l'industrie automobile donne de bons résultats dans ce domaine

Appliqué à des structures soumises à de la fatigue thermique : pas suffisant

Introduction de la prise en compte de la triaxialité sans introduire le taux de triaxialité via la pression hydrostatique



$$\Phi = W^* = W_d + \alpha P_{max}$$

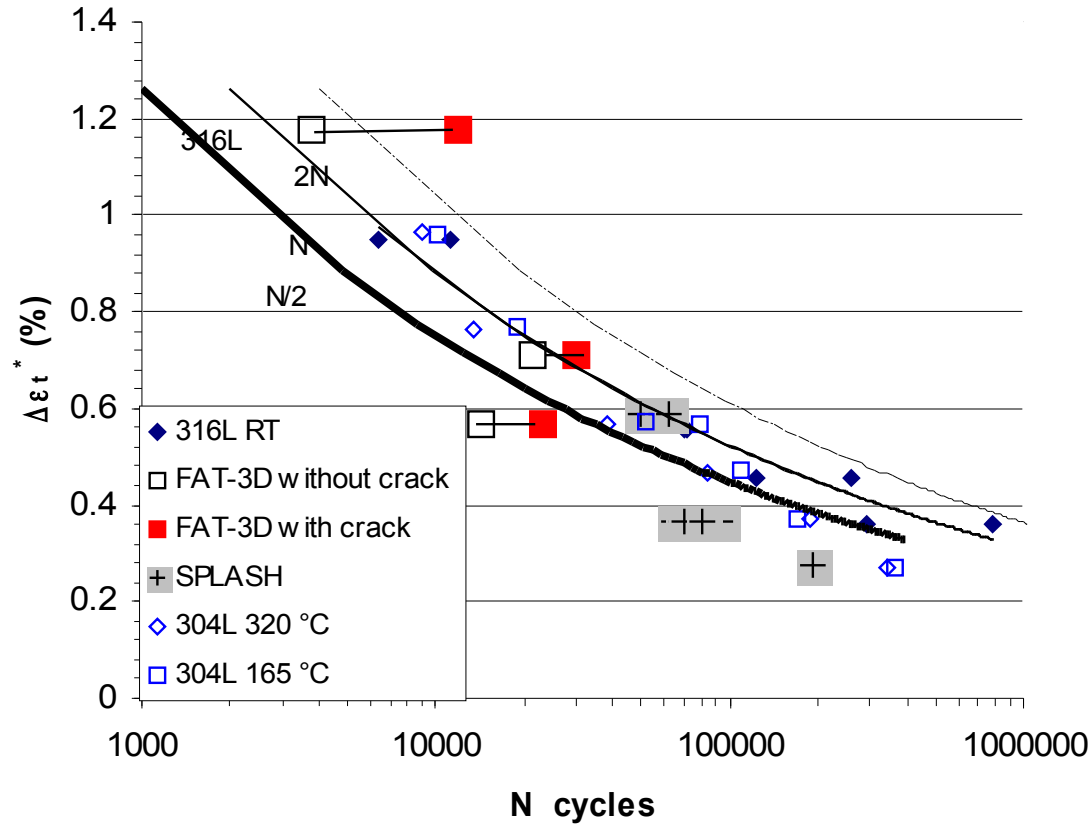
l'effet de contrainte moyenne est pris en compte par l'intermédiaire de :

$$W^* = W_d + \alpha (P_{moyen} + P_{amplitude})$$

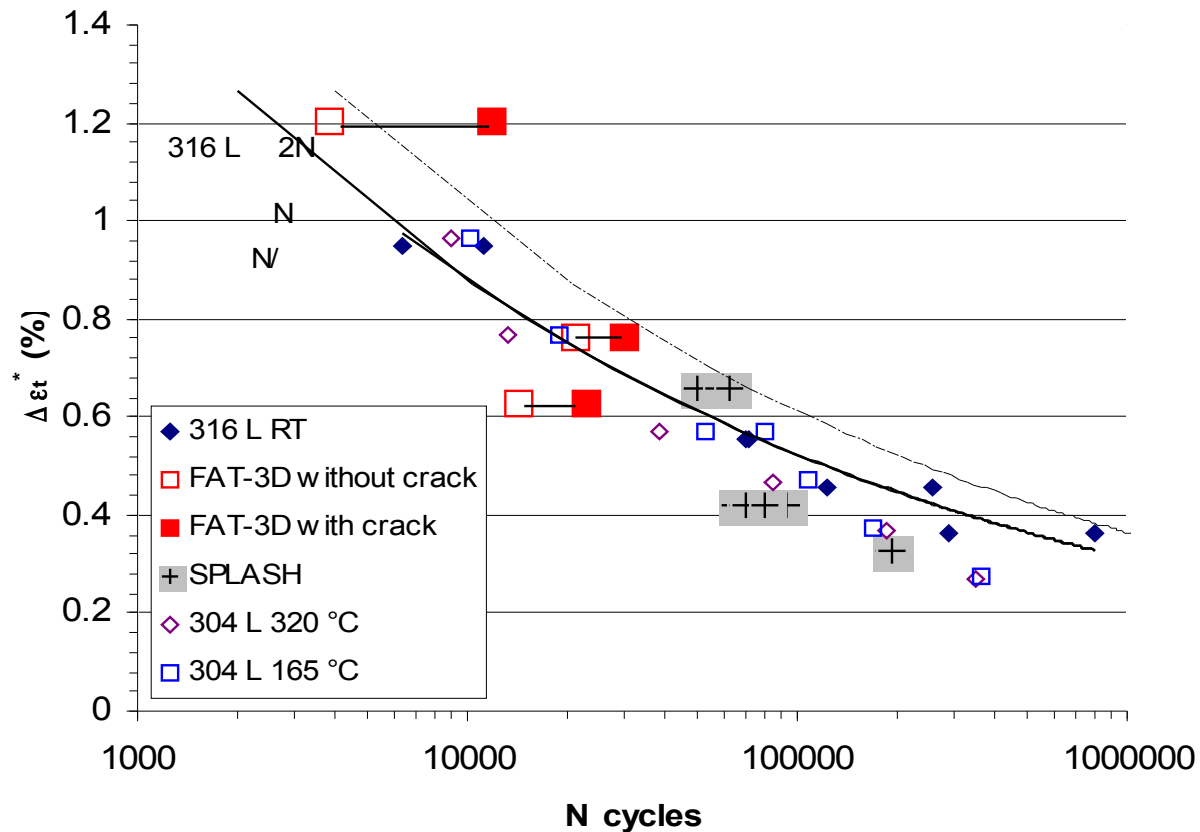
$$P_{max} = \max_t P(t) \text{ avec } P = \frac{1}{3} Tr \sigma$$

α paramètre matériau identifié à partir de 2 états de triaxialité différents : délicat à identifier

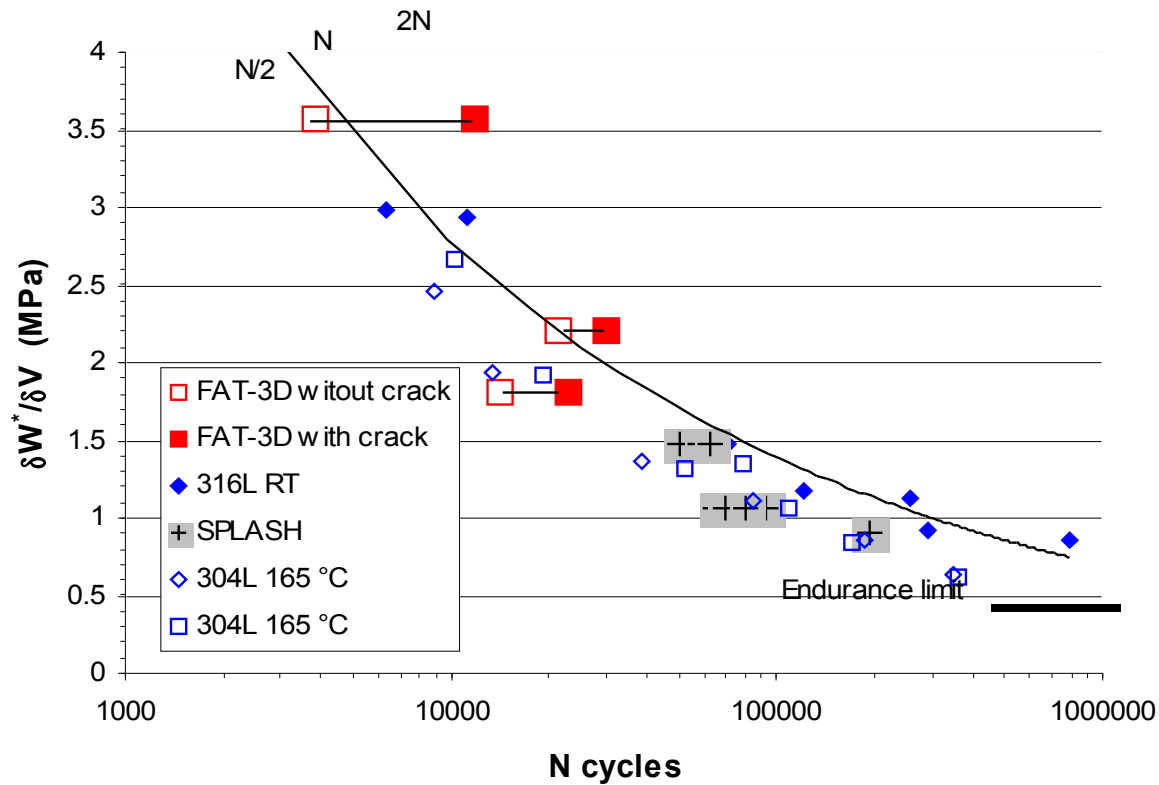
Critère de Manson-Halford



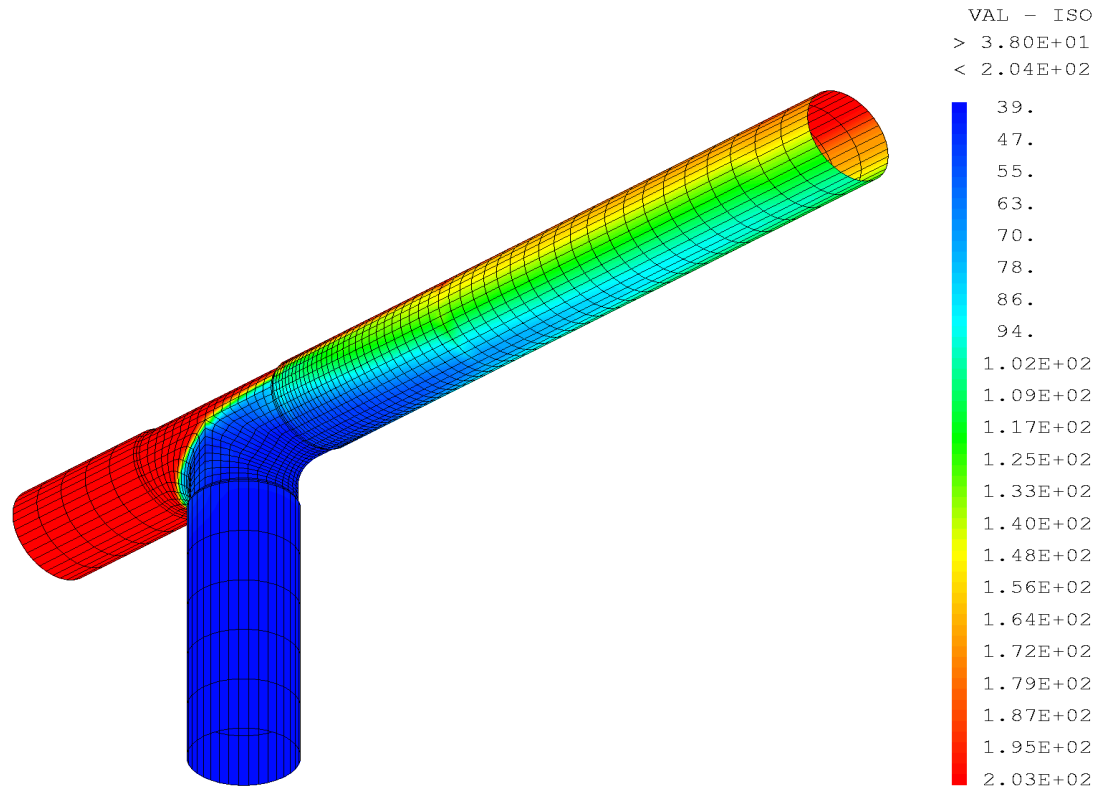
Critère de Zamrik



Critère énergétique avec pression hydrostatique



Applications des outils de fatigue biaxiale (thermique) sur une configuration de zone de mélange de fluide



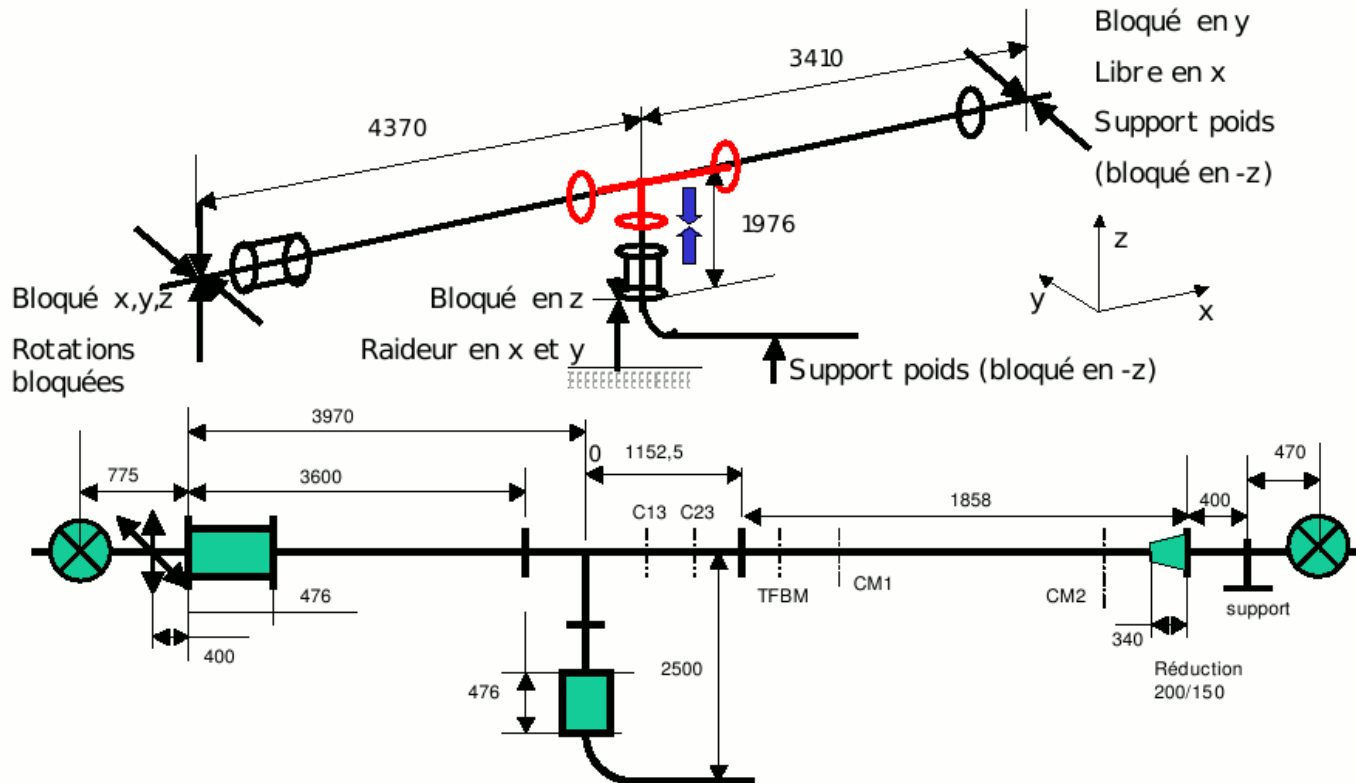
Réalisation de calculs élastiques et élasto-plastiques

Estimation de la durée de vie de la structure vis à vis de l'amorçage de fissures

Problématique des conditions aux limites

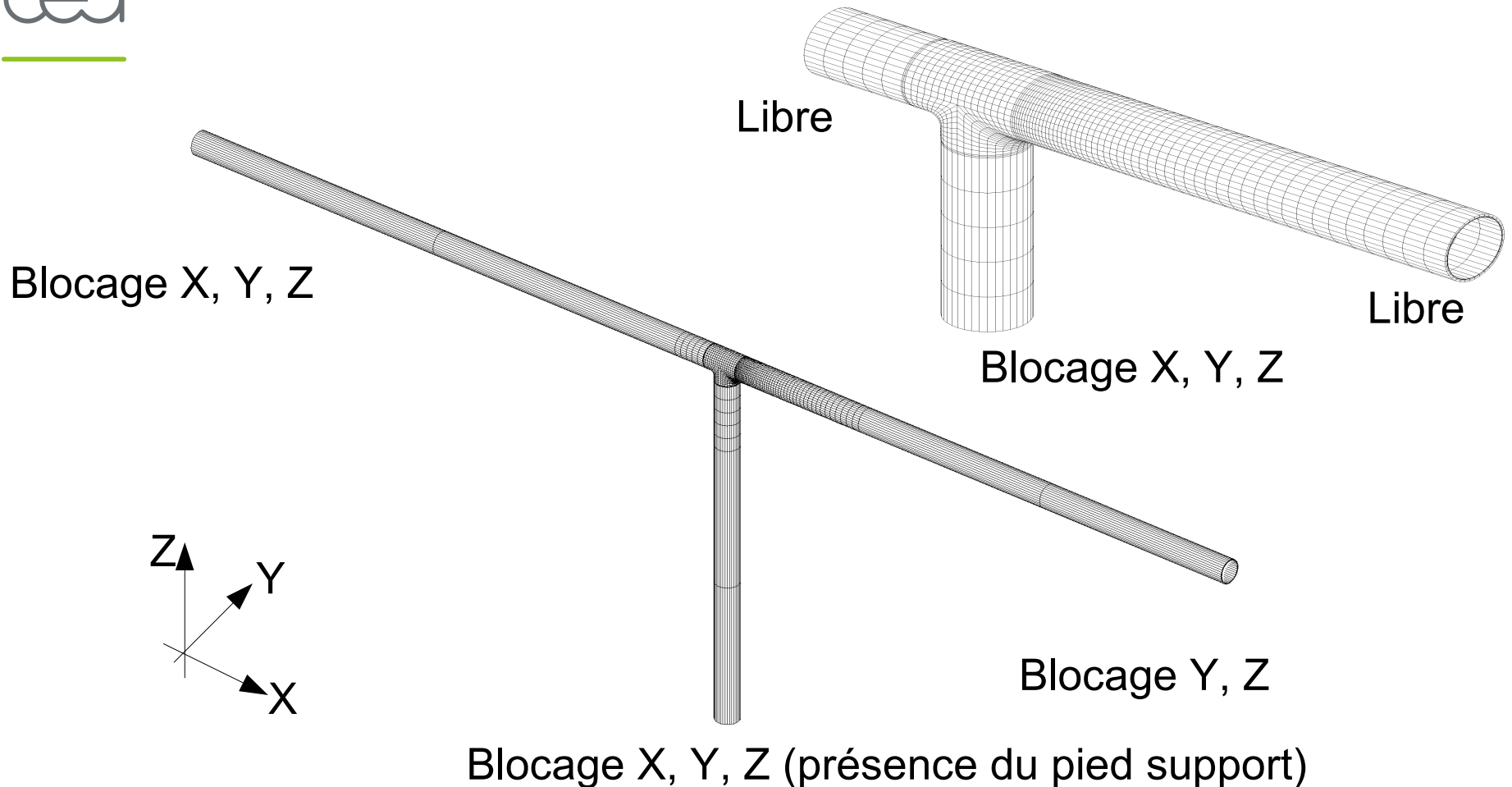
Pour le premier benchmark, un effort avait été fait afin de prendre en compte « le mieux possible l'isométrie de la ligne de mélange ».

Définition des conditions aux limites



Conditions aux limites imposées en déplacements

Rajout de longueur pour la prise en compte des supports de ligne



Comportement élasto-plastique avec une loi d'écrouissage cinématique non-linéaire et isotrope



$$f(\sigma, X, R) = \sigma_2(\sigma - X) - R(p) \leq 0$$

σ_2 : invariant d'ordre deux

p : déformation plastique cumulée

Variable d'écrouissage : R telle que :

$$dR = b(R_m - R) dp$$

Ecrouissage cinématique non-linéaire :

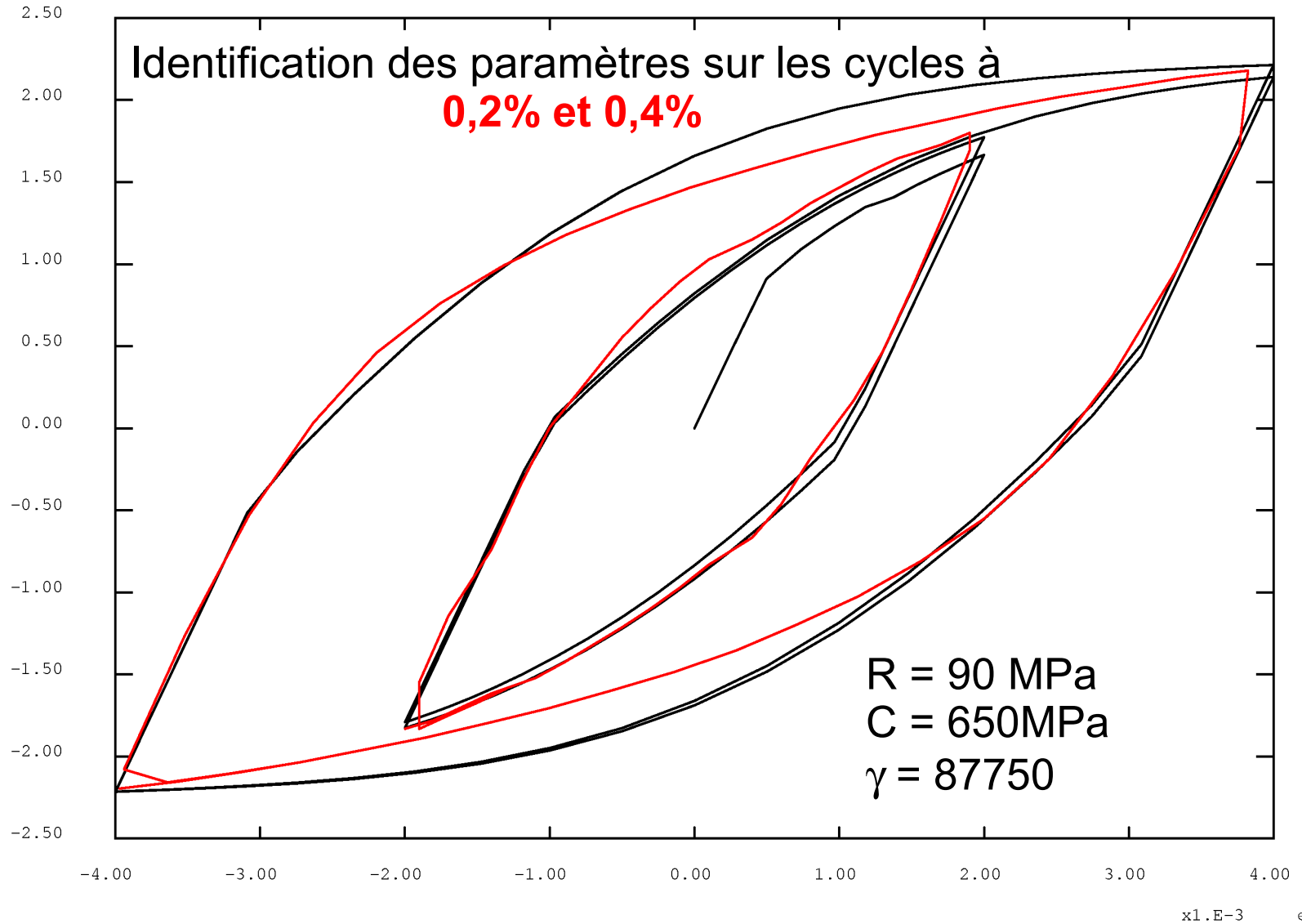
$$dX = 2/3 C d\epsilon_p - \gamma X dp$$

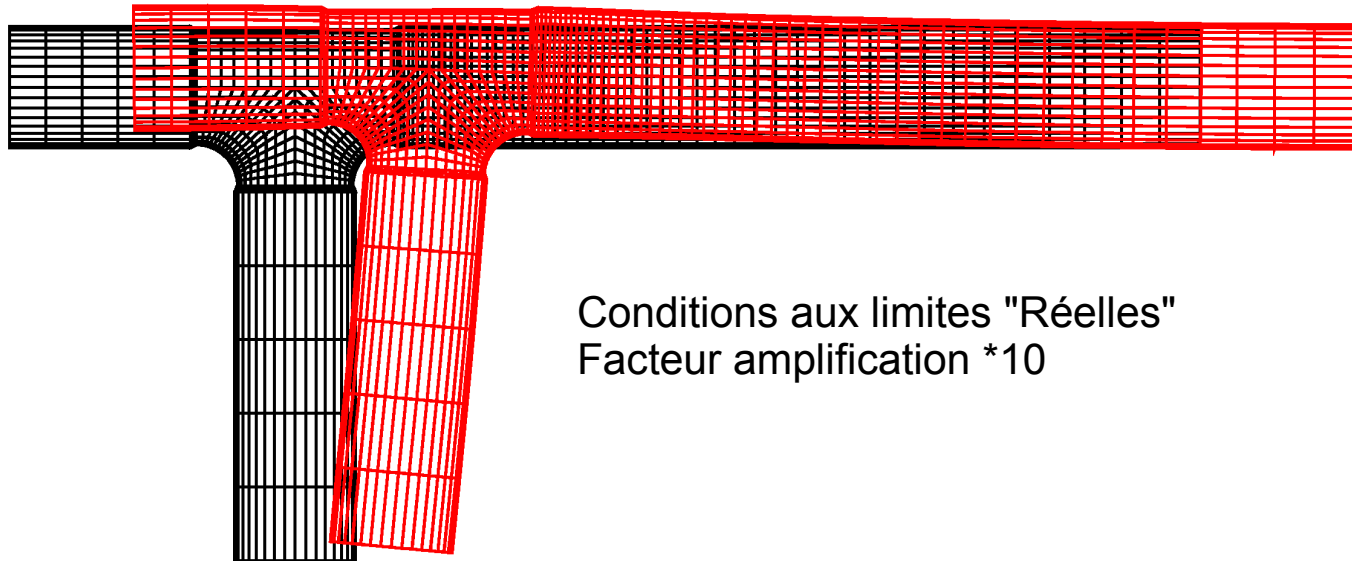
**Simplification : simulation thermo-mécanique à mi-durée de vie
Ecrouissage isotrope constant ($b=0$)**

Identification de R , C et γ à partir des données matériaux

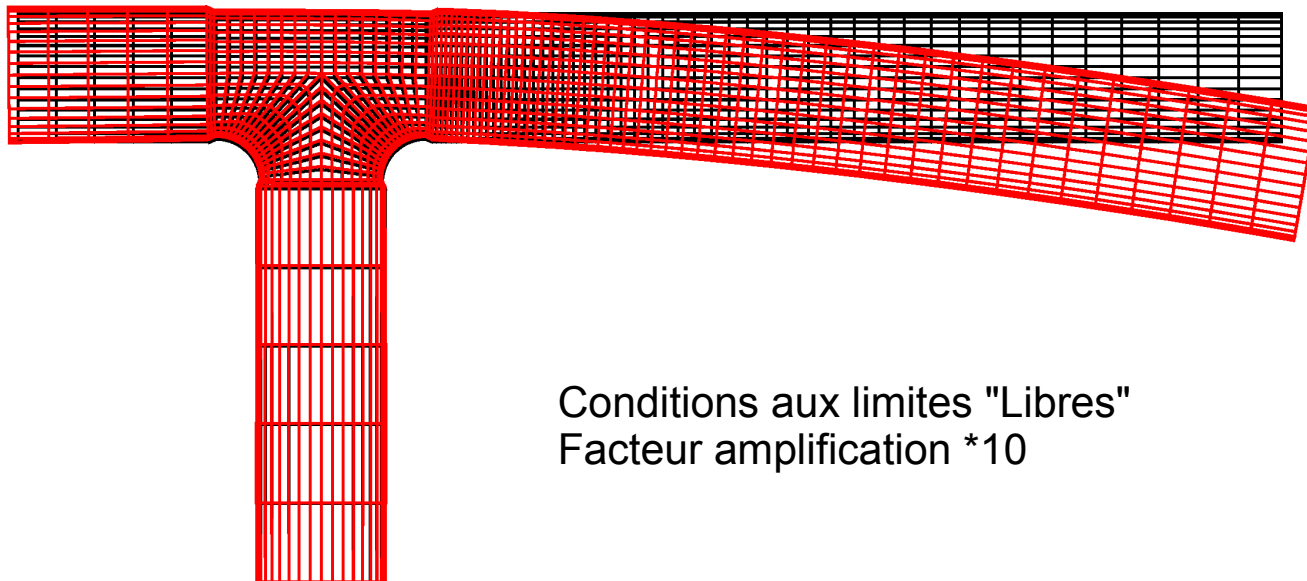
Modèle de comportement élasto-plastique

x1.E2 cont



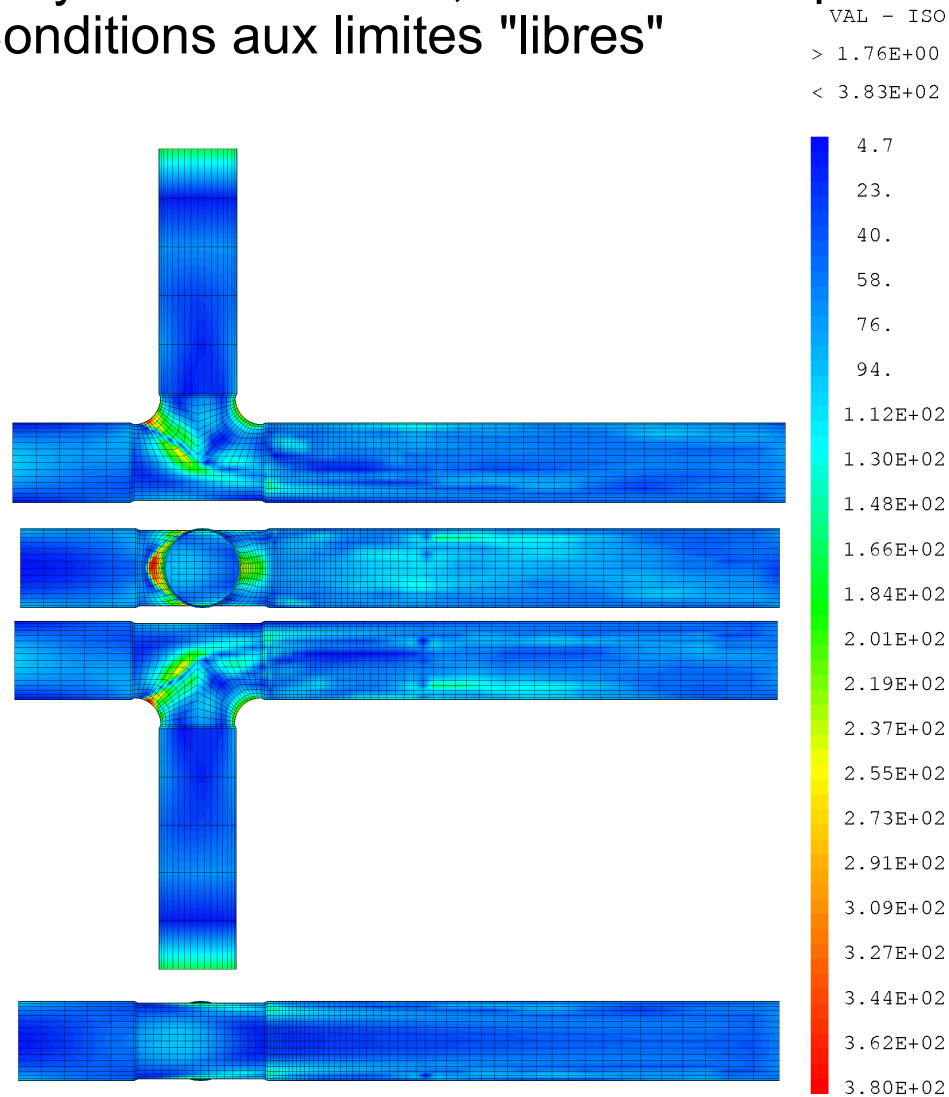


Conditions aux limites "Réelles"
Facteur amplification *10

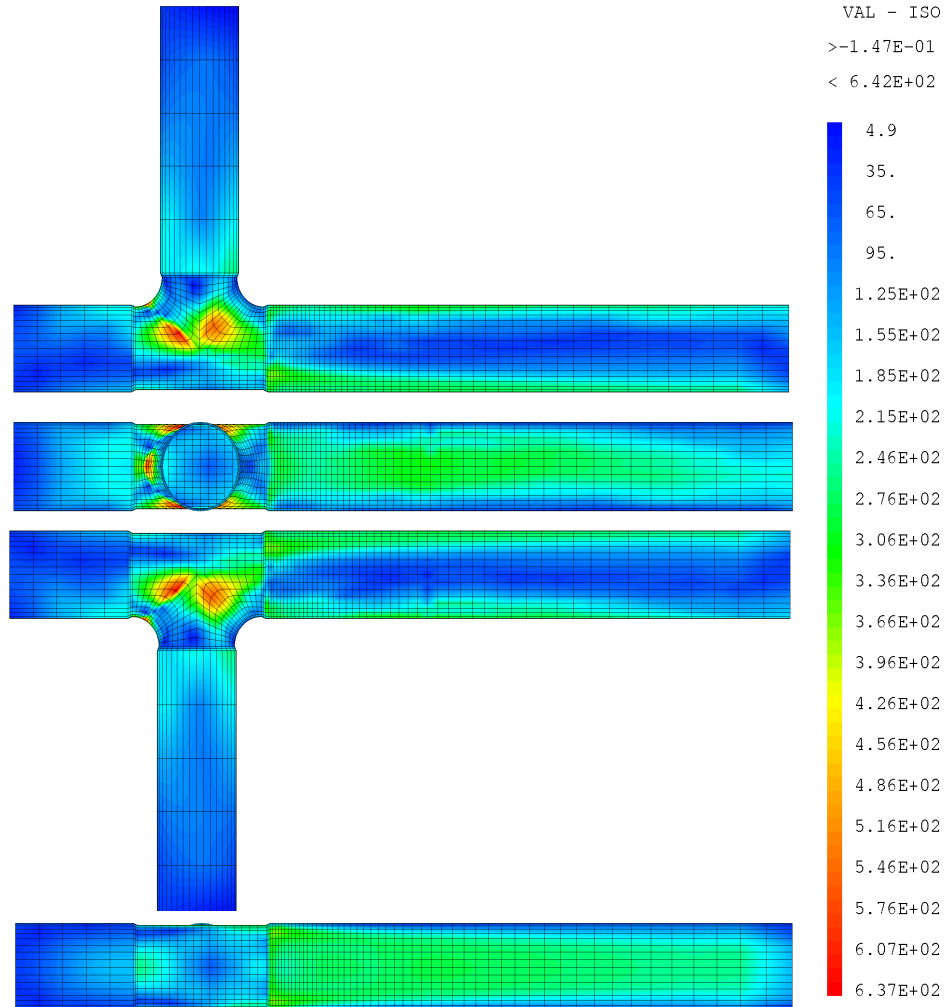


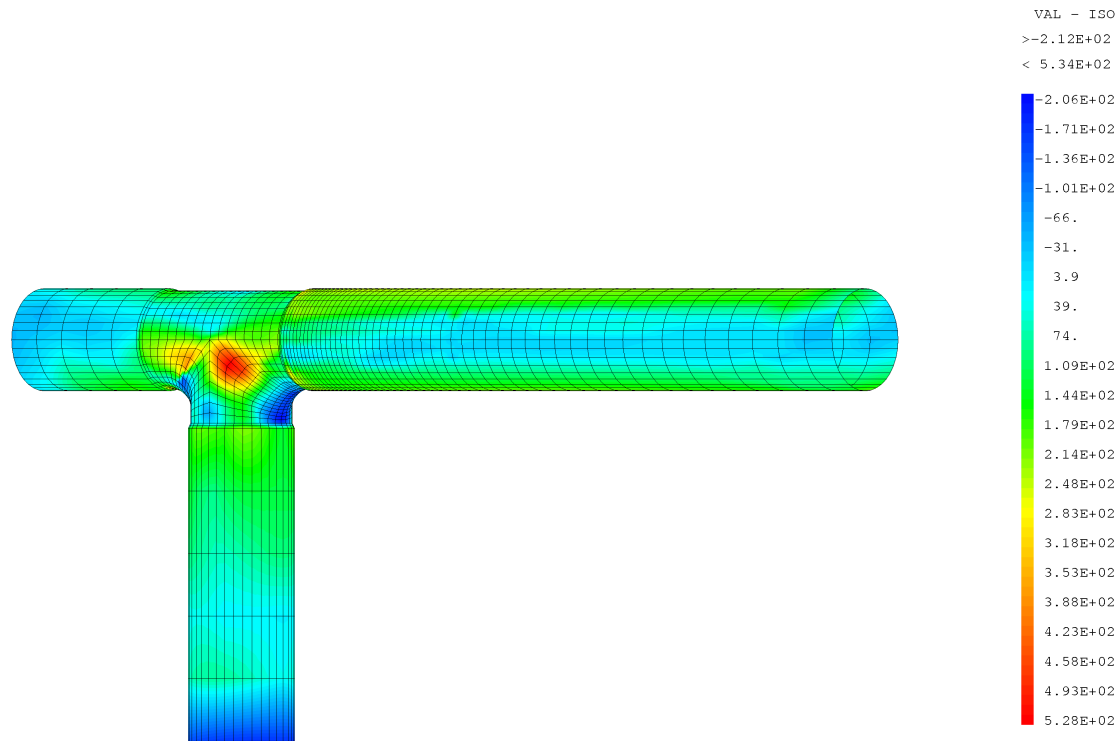
Conditions aux limites "Libres"
Facteur amplification *10

Contrainte moyenne de Tresca, Calculs élastiques Conditions aux limites "libres"



Contrainte moyenne de Tresca, Calculs élastiques Conditions aux limites "Réelles"



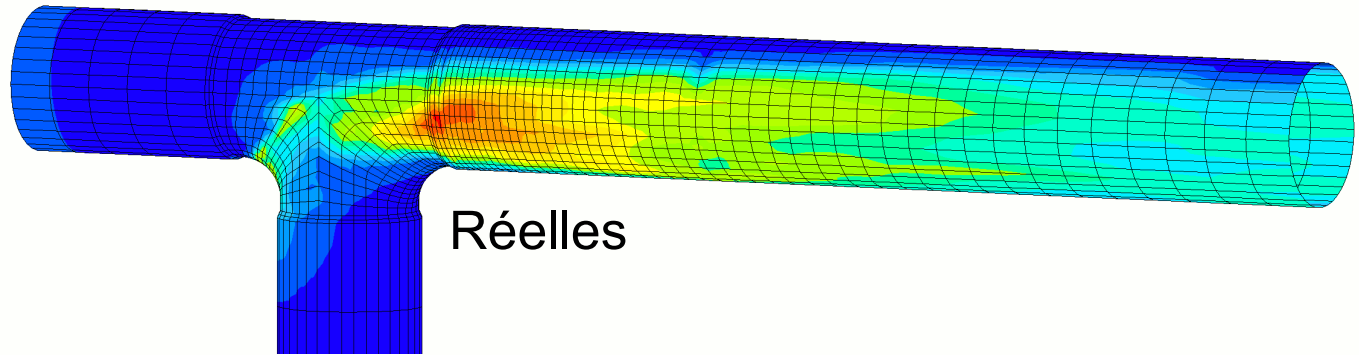


Forte disparité des contraintes moyennes dans le Té

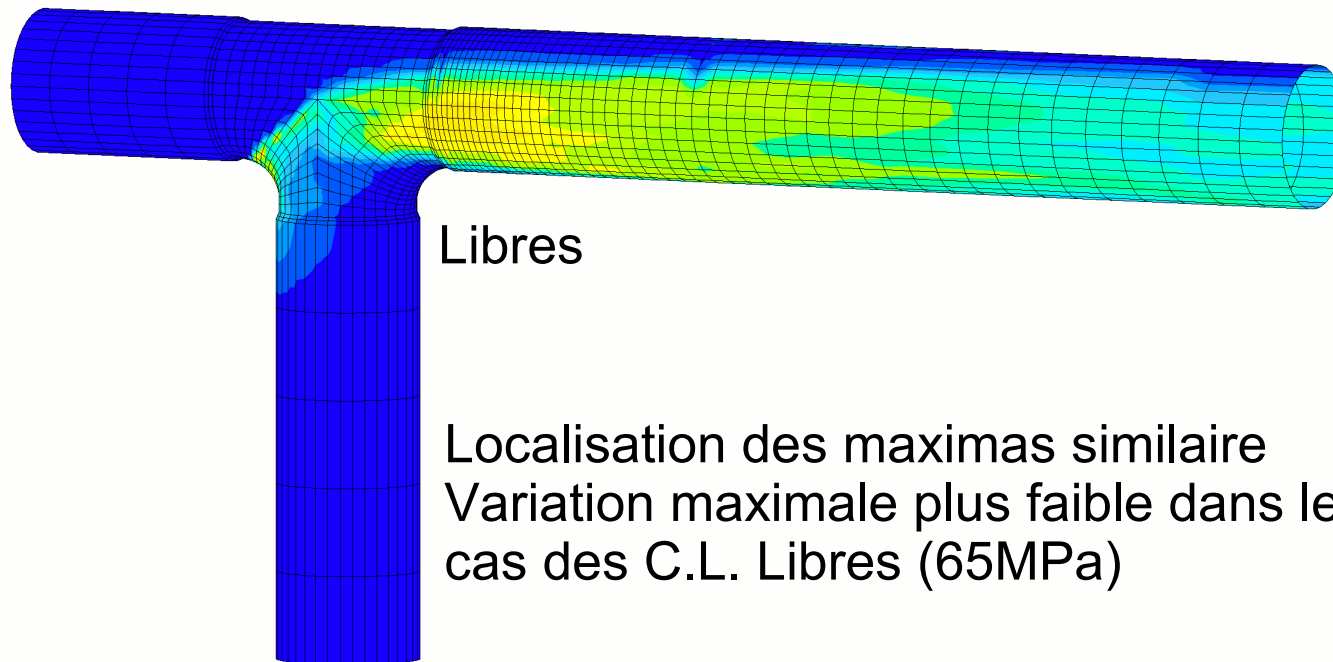
- jusqu'à 500MPa
- sur les flancs du té
- dans les rayons de raccordement

Calculs élastoplastiques

Comparaison des variations de contraintes équivalentes



Réelles



Libres

Localisation des maximas similaire
Variation maximale plus faible dans le
cas des C.L. Libres (65MPa)

Méthodologie

Détermination des évolutions en chaque point de la peau interne des critères multiaxiaux

- En non-linéaire
 - En déformation
 - Zamrik
 - Manson-Halford
 - Déformation totale équivalente
- En énergie
 - Energie plastique
 - Energie totale
 - Critère énergétique plastique avec prise en compte de la contrainte hydrostatique

Estimation du nombre de cycles

Comptage de cycle suivant la norme RAINFLOW

Règle du cumul de dommage linéaire

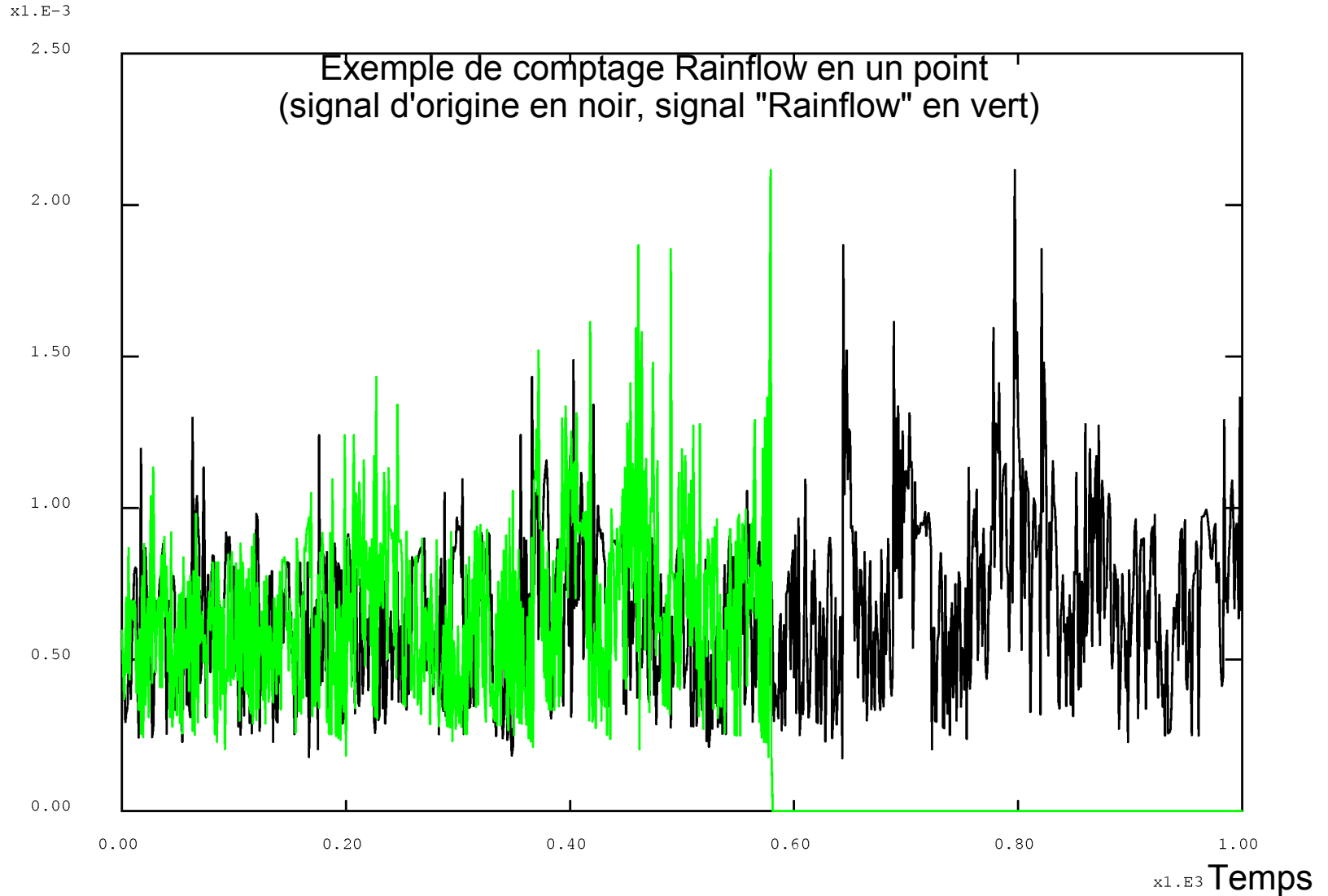
Utilisation de la courbe de fatigue ASME-A et ASME-C

Courbe de fatigue Conditions aux limites Critère de fatigue	ASME-A		ASME-C	
	Libre	Réelles	Libre	Réelles
Zamrik	530H	386H	384H	343H
Manson-Halford	446H	387H	343H	312H
Déformation équivalente	infini	24768H	4810H	1606H
Energie dissipée et Pmax	76H	73H	67H	53H
RCC-MR (calcul élastique)	infini	infini	7739H	5444H
Déf. équi. élastique	infini	infini	23466H	25899H

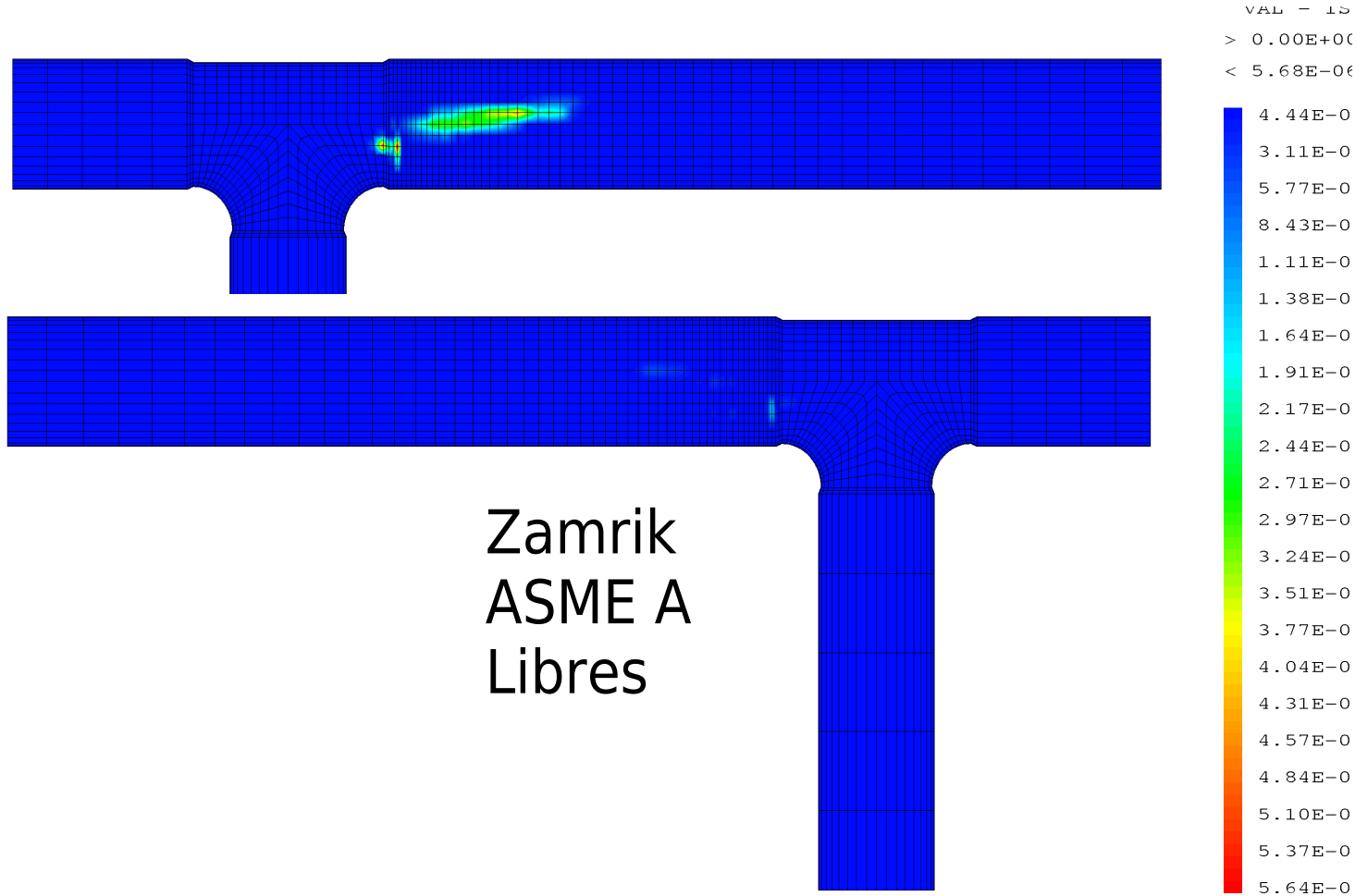
Pour rappel, il a été mesuré (par mesures ultra-sons) des indications d'endommagement à partir de 200H



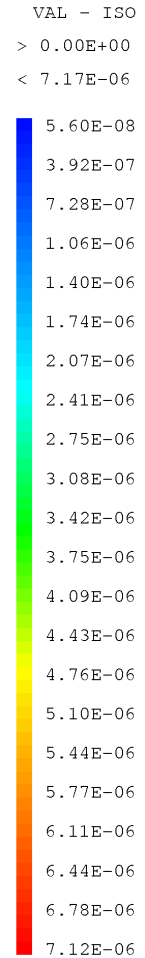
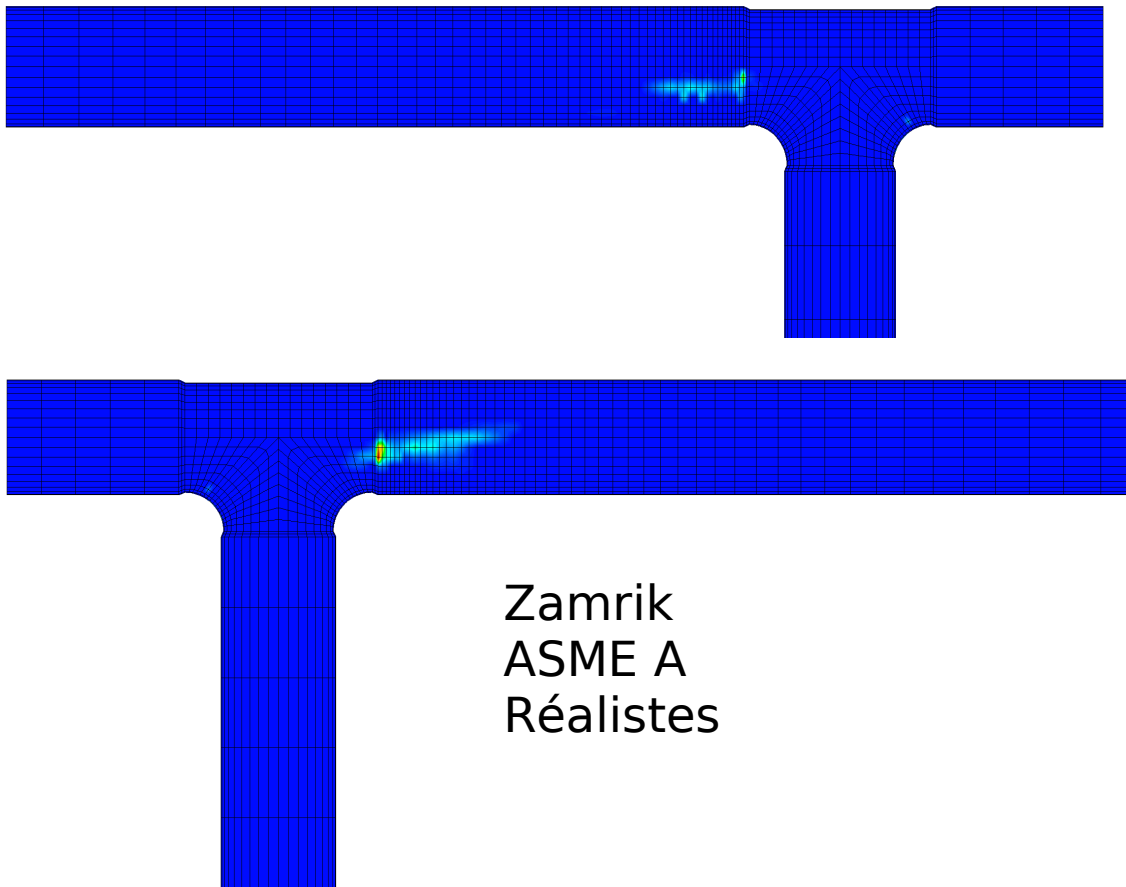
Déformation de Zamrik



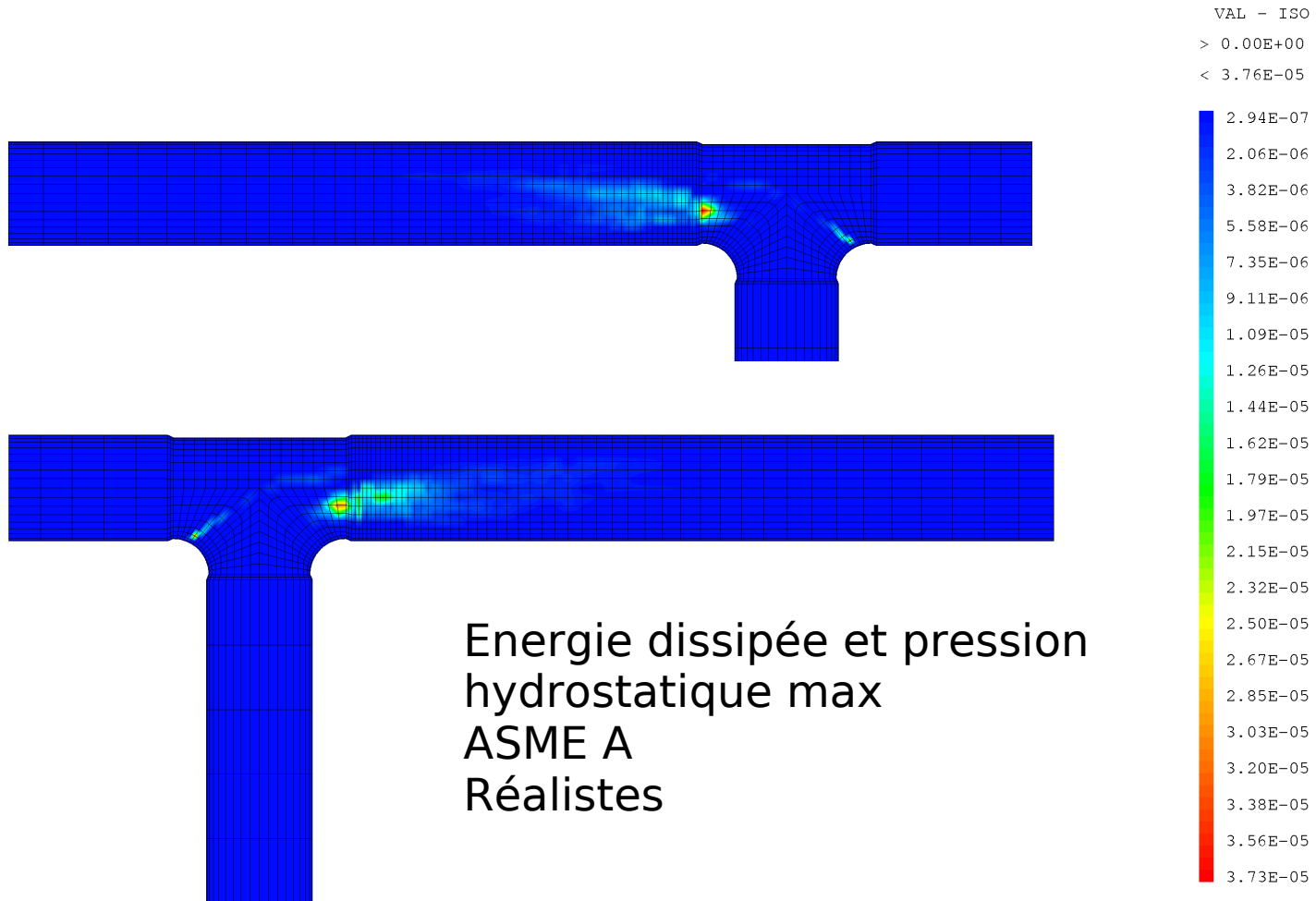
Carte de dommage avec le critère de ZAMRIK et les conditions aux limites "Libres"



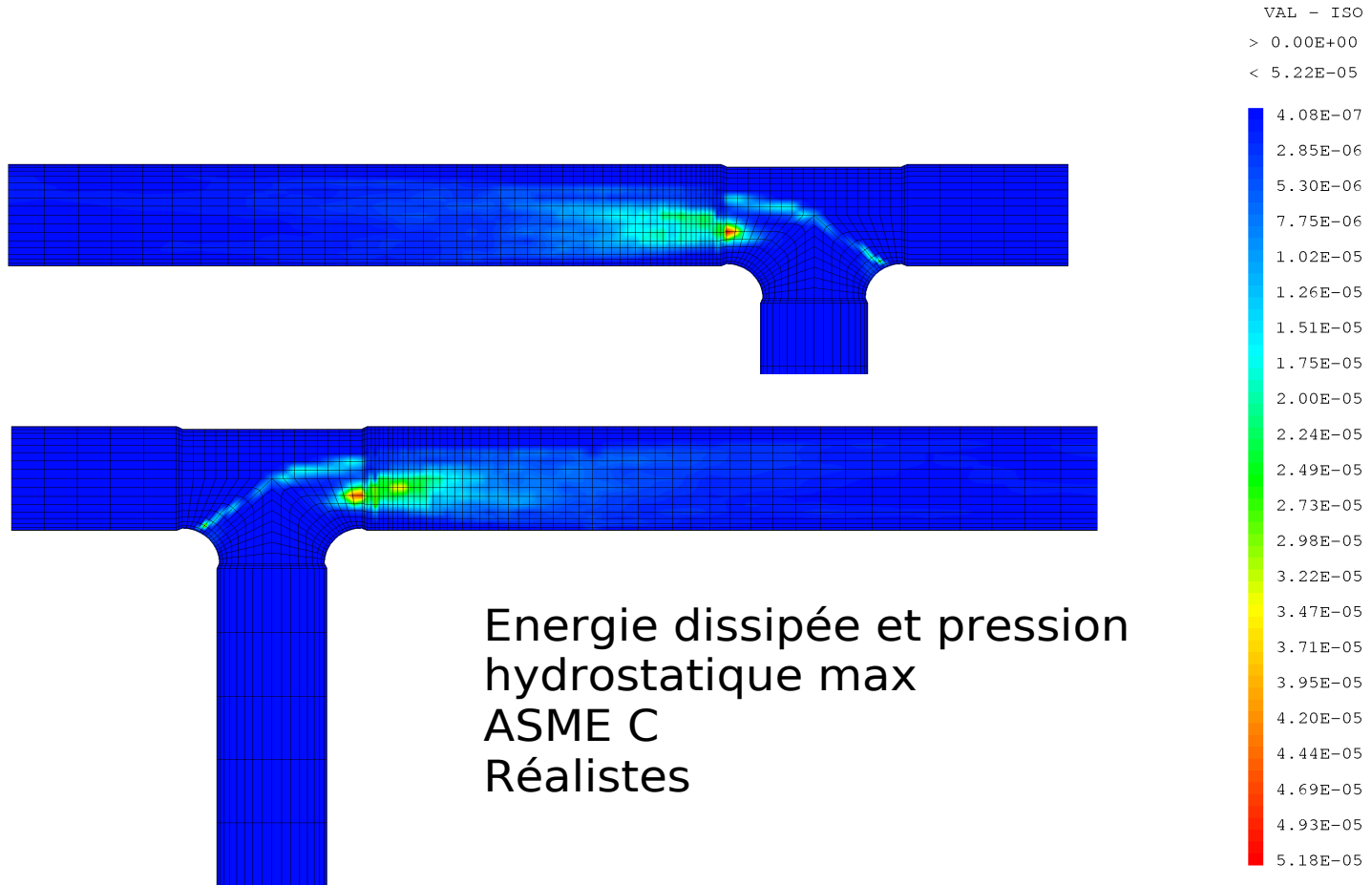
Carte de dommage avec le critère de ZAMRIK et les conditions aux limites "Réelles"



Carte de dommage avec le critère de l'énergie dissipée et pression hydrostatique avec les conditions aux limites "Réelles" et la courbe ASME A



Carte de dommage avec le critère de l'énergie dissipée et pression hydrostatatique avec les conditions aux limites "Réelles" et la courbe ASME C



La problématique de la fatigue thermique fait intervenir la multiaxialité du chargement

 Adoption d'une démarche intégrable dans les règles de dimensionnement (RCC-MR)

Utilisation des courbes de fatigue uniaxiale, Utilisation de critères permettant le passage d'un état biaxial à un état uniaxial.

Développement de quelques outils dans Cast3M pour traiter la fatigue biaxiale

Applications de ces outils lors d'un benchmark concernant une zone de mélange

- Utilisation de critères de fatigue multiaxiaux validés sur des essais de fatigue thermique
- Détermination du taux d'usage avec différents critères de fatigue multiaxiaux
- Obtention de carte de dommage sur la géométrie complète de la peau interne de la maquette FATHER
 - Localisation des dommages limitée à la couronne C11 et inhérente aux chargements thermiques